

УДК 621.746

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЧУГУНА ЭКОНОМНО-ЛЕГИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКОЙ,
ПОЛУЧЕННОЙ ПУТЕМ ЭЛЕКТРОХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ****М.В. СЕМЕНЧЕНКО***(Полоцкий государственный университет);***д-р техн. наук, доц. В.М. КОНСТАНТИНОВ, Т.В. МИХАЙЛОВСКАЯ***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Отмечена актуальность процесса модифицирования расплава чугуна для повышения технологических и служебных свойств материала. Приведены типы модификаторов и способы модифицирования расплава. Отмечено, что наиболее удобным и технически легко осуществимым является ввод модифицирующей порошковой проволоки. Показана актуальность замены порошковой проволоки, применяемой в качестве модификатора, на более дешевую экономно-легированную проволоку. Предложен способ получения экономно-легированной проволоки и установка для его реализации. Способ основан на совмещении электроконтактного нагрева и термоциклирования, осуществляемого по маятниковой схеме. Получаемая экономно-легированная проволока отличается более высоким качеством поверхности по сравнению с традиционным диффузионным насыщением в печи и более низким градиентом концентрации легирующего элемента по поперечному сечению. Введение данной проволоки в расплав оказывает влияние на механические свойства чугуна.

Модифицирование – один из эффективных методов металлургии, позволяющий воздействовать на состояние металлических расплавов путем введения малых добавок веществ, приводящих к изменению размеров и формы структурных составляющих и, соответственно, к повышению технологических и служебных свойств материалов.

Эффект модифицирования определяется количеством возникших дополнительных центров кристаллизации и их каталитической активностью. Последнее условие обеспечивается полным кристаллографическим соответствием выделившихся в зонах растворения модификатора частиц первичного графита [1]. Для этого необходимо выполнение первого условия – создания максимального числа активных дополнительных центров кристаллизации, период существования которых соизмерим с интервалом времени между вводом модификатора в расплав и затвердеванием отливки, что достигается за счёт:

- стимулирования выделения углеродсодержащих фаз при растворении модификатора;
- повышения устойчивости дополнительных центров кристаллизации после растворения модификатора;
- сокращения интервала времени между вводом модификатора и затвердеванием отливки.

Сегодня существует свыше пятисот действующих типов различных модификаторов, содержащих от 2...3 компонентов, до полутора десятков [1]. С учетом запатентованных составов количество различных типов модификаторов более тысячи. Среди них можно выделить [4]:

- порошки или смеси порошков, с размером частиц 1...4 мм [2];
- нанопорошки (размер ≤ 100 нм), полученные методом плазмохимического взрыва;
- порошковые проволоки, состоящие из металлической оболочки и шихты. Химический состав шихты и диаметр проволоки (8...22 мм) зависят от производителя [1];
- пластины толщиной до 5 мм [3];
- комплексные элементы, состоящие из легкорастворимой модифицирующей присадки и фильтрующей сетки.

Известны различные способы модифицирования чугуна [5]:

- модифицирование в ковше;
- модифицирование в форме;
- модифицирование в специальной реакционной камере (метод Флотрет);
- обработка чугуна модифицирующей проволокой.

Наиболее удобный и технически легко осуществимый способ – ввод модифицирующей порошковой проволоки в расплав. При подаче в металл проволоки с регулируемой скоростью, обеспечивающей требуемый расход модификатора, процесс модифицирования протекает без дыма и пироэффекта, а степень усвоения легирующего элемента по сравнению с обработкой в ковше увеличивается почти в 1,5...2 раза.

Порошковая проволока, обладая рядом преимуществ, в ряде случаев отличается повышенной стоимостью из-за неоправданно высокой концентрации легирующих элементов, что требует точных экономических расчетов при модифицировании расплава чугуна для небольшой партии деталей специального назначения. Поэтому весьма актуальной является задача получения более дешевой проволоки, которая позволит обеспечить требуемый эффект модифицирования и применение которой будет оправданно с

экономической точки зрения. Один из путей решения данной задачи – экономное поверхностное диффузионное насыщение стальной проволоки различными легирующими элементами, позволяющее оптимизировать концентрацию легирующих элементов в модификаторе без значительного повышения его стоимости.

Диффузионное насыщение проволоки в традиционных порошковых насыщающих смесях в печах трудоемко и энергозатратно, требует разработки специальных контейнеров [6], которые к тому же ограничивают длину получаемой проволоки. Формируемый диффузионный слой хрупок, скалывается при незначительном внешнем воздействии.

Анализ различных способов интенсификации диффузионного насыщения [7 – 8] применительно к проволоке показал, что для проволоки наиболее приемлемой с точки зрения технической реализации является электрохимико-термическая обработка, осуществляемая путем прямого пропускания тока через изделие в режиме термоциклирования. В этом случае обработка может осуществляться непрерывно, оборудование не требует значительных затрат, за незначительный промежуток времени (1...2 с) достигаются значительные температуры (1100...1200 °C и выше) [7]. При этом проволока может быть легирована различными химическими элементами.

Особый интерес вызывает диффузионное насыщение, основанное на совмещении электрохимико-термической обработки и термоциклирования. Технологические процессы термоциклирования состоят из многократных нагревов и охлаждений, режимы которых имеют два характерных отличия от традиционного метода термической обработки:

- отсутствие выдержки при постоянной температуре нагрева;
- осуществление многократных нагревов и охлаждений с оптимальными скоростями.

В зависимости от температуры процесса можно выделить низко-, средне- и высокотемпературное термоциклирование, а в зависимости от условий нагрева и охлаждения – маятниковое термоциклирование и термоциклирование с промежуточными охлаждениями до комнатной температуры [9].

Изучение кинетики роста толщины диффузионных слоев при традиционном диффузионном насыщении в печи показало, что использование маятниковой схемы термоциклирования при борировании приводит не только к сокращению длительности термической обработки, но и к увеличению толщины борированного слоя на 20...25 % [8].

Исходя из представленного анализа нами предложен способ диффузионного насыщения проволоки [10], основанный на совмещении электроконтактного нагрева и термоциклирования, осуществляемого по маятниковой схеме, который может быть реализован для насыщения проволоки как карбидообразующими элементами, так и элементами, растворяющимися в α - и γ -железе. Предложенный способ позволяет получить относительно недорогостоящую проволоку по сравнению с порошковой и за значительно меньший период времени по сравнению с традиционным насыщением в печи (время нахождения каждого микрообъема металла проволоки в зоне диффузионного насыщения составляет 2...4 мин).

Для реализации указанного способа нами была разработана [11], смонтирована и опробована лабораторная установка для электрохимико-термической обработки проволоки (рис. 1).

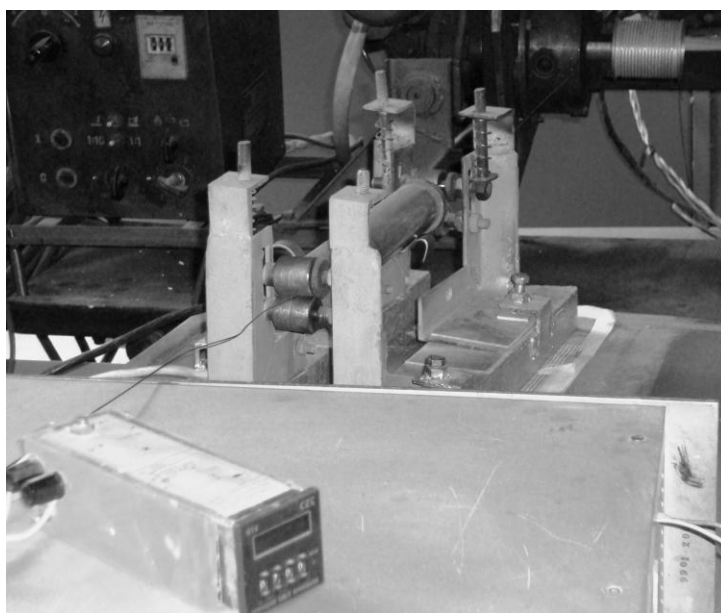


Рис. 1. Внешний вид лабораторной установки для электрохимико-термической обработки проволоки

Нагрев проволоки осуществляется путем непосредственного пропускания тока через изделие. Блок управляющих импульсов (задает амплитуду (силу тока), продолжительность импульса и длительность паузы между импульсами) обеспечивает реализацию термоциклирования. Длина зоны диффузионного насыщения может изменяться в зависимости от требуемого общего времени обработки и количества тепла, необходимого для реализации процесса диффузионного насыщения. Проволока в зону диффузионного насыщения подается непрерывно с постоянной скоростью.

Работает установка следующим образом (рис. 2): проволока подается из бухты 2, проходит конвейер 3 с насыщающей смесью со скоростью $V = 0 \dots 0,1$ м/мин и наматывается на барабан 8. К токопроводящим роликам 4 подается электрический ток от трансформатора 1. Блок управляющих импульсов 5 через тиристор 7 обеспечивает реализацию режима термоциклирования.

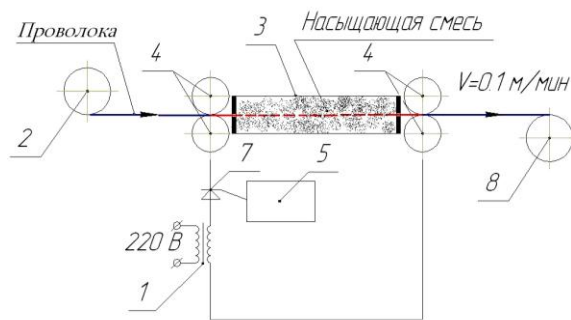


Рис. 2. Схема лабораторной установки для непрерывной электрохимико-термической обработки проволоки

Для реализации термоциклирования по маятниковой схеме электрический ток пропускали через проволоку с длительностью импульса 1...10 с и длительностью паузы 1...3 с.

Свойства полученной диффузионно-легированной проволоки исследовали по известным методикам. Приготовление шлифов производили согласно ГОСТ 9.302-88. Измерение микротвердости проводили по ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3. Измерение толщины диффузионного слоя осуществляли с помощью микроскопа прибора ПМТ-3.

Нами исследовалась возможность насыщения проволоки Св08Г2С ГОСТ 2246-80 диаметром 1,2 мм бором, титаном и алюминием [12 – 13].

Диффузионное насыщение проволоки указанными элементами обусловлено тем, что введение бора и титана, являющихся карбидо- и нитридообразующими элементами ведет к снижению в модифицируемом растворе концентрации серы, кислорода, азота, а также к развитию сложных физико-химических процессов образования карбидов, нитридов, карбонитридов, следствием чего становится измельчение первичного аустенита за счет увеличения числа центров кристаллизации и увеличения склонности чугуна к графитизации за счет снижения в растворе карбидостабилизирующих элементов [1]. Образовавшиеся при этом соединения играют роль дополнительных центров кристаллизации графита. Однако, как отмечено в работе [14], применение в небольших количествах титана с целью усиления графитизации и размельчения графита при производстве мелких отливок не может быть использовано при производстве крупных отливок. В крупных отливках из чугуна, содержащего около 3,5 % углерода, вследствие замедленного их охлаждения титан в количестве 0,06 % вызывает повышенную склонность к интенсивной графитизации и, как следствие, приводит к ухудшению характера морфологии графитной фазы, сопровождающемуся падением прочности.

Введение в расплав алюминия способствует тому, что в период эвтектической кристаллизации уменьшается растворимость углерода в растворе, повышается его активность и снижается относительное переохлаждение при эвтектической кристаллизации. Все это способствует активации образующихся при модифицировании неметаллических включений в качестве центров кристаллизации графита, изменению формы графитовых включений и повышению графитизирующей способности чугуна.

Металлографические исследования проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению бором, показали, что на поверхности проволоки не происходит формирования химического соединения (FeB и FeB_2). Микротвердость диффузионного слоя на расстоянии 10 мкм от поверхности достигает 4000 МПа, а в ряде случаев только 3000 МПа. Это соответствует микротвердости твердого раствора бора в α -железе. Микротвердость по сечению проволоки уменьшается постепенно. Микротвердость сердцевины составляет порядка 1150...1300 МПа. Это, вероятно, обусловлено применением внутреннего источника нагрева, при котором температура проволоки выше температуры окружающей среды, а скорость диффузии легирующего элемента в насыщенную металл проволоки значительно превосходит скорость его осаждения на

поверхность проволоки. Это способствует тому, что проволока, полученная предложенным способом, отличается более высоким качеством поверхности по сравнению с традиционным диффузионным насыщением в печи и более низким градиентом концентрации легирующего элемента по поперечному сечению, что уменьшает скалывание диффузионного слоя, а следовательно уменьшение концентрации легирующего элемента при последующем применении проволоки.

Следует отметить, что при определенных режимах диффузионного насыщения не наблюдается характерной игольчатости борированного слоя (рис. 3). Это можно объяснить значительным разогревом поверхности (до формирования жидкой фазы), при котором насыщающий порошок, попав на поверхность проволоки, расплавляется в основном металле. При этом реализуется также такой способ интенсификации процесса диффузионного насыщения как повышение температуры процесса (возможно, до интервала ликвидус-солидус). Учитывая, что диффузионному насыщению подвергается проволока, движущаяся непрерывно, при соответствующем подборе режима термоциклирования разрыва проволоки в месте выхода расплавленного металла на поверхность не происходит.

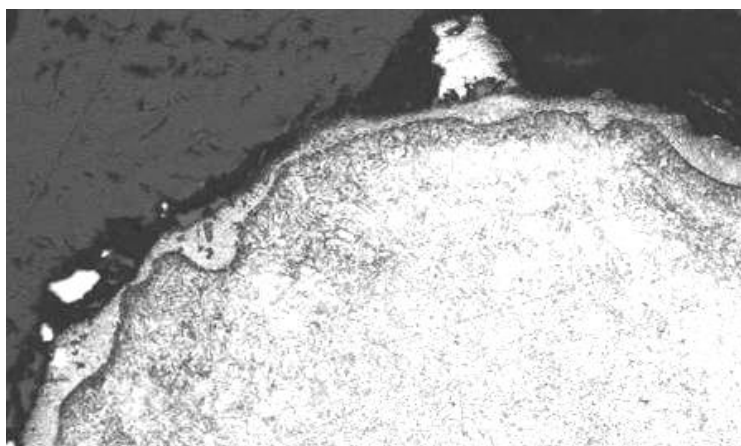


Рис. 3. Микроструктура проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению бором, $\times 100$

Было проведено диффузионное насыщение проволоки титаном. Проведенные металлографические исследования показали, что происходит формирование сплошного слоя (рис. 4). Значение микротвердости диффузионного слоя в продольном направлении проволоки изменяется незначительно, в поперечном направлении плавно снижается от 3500...4200 МПа на поверхности образца до 1200...1500 МПа на видимой границе раздела слой – сердцевина.



Рис. 4. Микроструктура проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению титаном, $\times 200$

Проведенные металлографические исследования проволоки подвергнутой диффузионному насыщению алюминием (рис. 5) показали, что микротвердость диффузионного слоя составляет 2100...2300 МПа. Толщина диффузионного слоя в зависимости от режима диффузионного насыщения достигала 120...150 мкм.

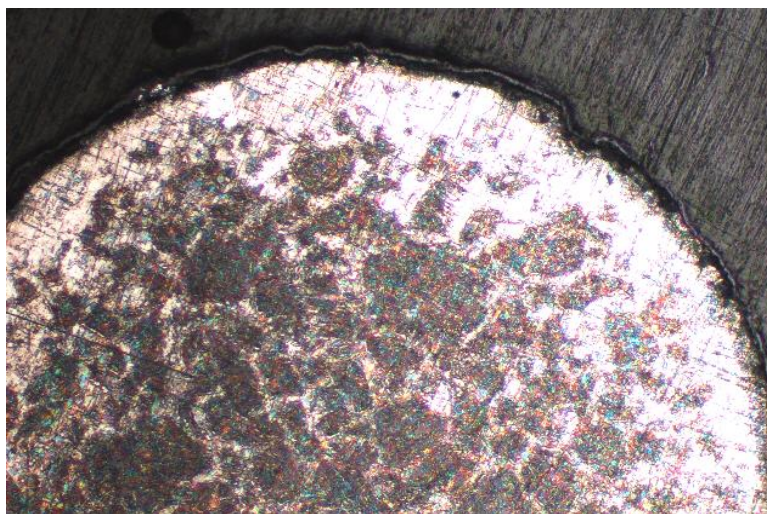


Рис. 5. Микроструктура проволоки, подвергнутой диффузионному насыщению алюминием, $\times 100$

Нами было проведено модифицирование расплава серого чугуна СЧ 20 ГОСТ 1412 проволокой, подвергнутой диффузионному насыщению алюминием, в условиях РУП «Минский тракторный завод» и ОАО «Технолит-Полоцк».

Введение данной проволоки в расплав оказало влияние на механические свойства чугуна. Временное сопротивление при растяжении у чугуна, модифицированного проволокой, подвергнутой диффузионному насыщению алюминием, и отлитого в песчано-глинистую форму, снизилось с 176 до 126 МПа. Также произошло значительное понижение твердости с 171 до 143 единиц НВ. Измерение твердости материала тонкостенной отливки показало: твердость чугуна, модифицированного проволокой, подвергнутой диффузионному насыщению алюминием, и отлитого в кокиль, составляет 23...24 единицы HRC, в отличие от немодифицированного чугуна, твердость которого равна 54...55 единицы HRC.

Полученное снижение механических свойств, хорошие литейные свойства и низкая склонность к отбелу чугуна может найти применение для ряда отливок: отопительный радиатор, печное литье (дверки, заслонки, колосники).

Таким образом, можно сделать следующие **выводы**:

- в настоящее время существуют различные типы модификаторов и способы модифицирования чугуна. Наиболее удобным и технически легко осуществимым является ввод модифицирующей порошковой проволоки;
- применение порошковой проволоки требует точных экономических расчетов при модифицировании расплава чугуна для небольшой партии деталей специального назначения. Поэтому актуальным является замена порошковой проволоки, применяемой в качестве модификатора, на более дешевую экономно-легированную проволоку;
- электрохимико-термическая обработка, реализуемая путем совмещения электроконтактного нагрева и термоциклирования, – один из способов получения дешевой экономно-легированной проволоки для модифицирования расплава;
- проволока, полученная предложенным способом, отличается более высоким качеством поверхности по сравнению с традиционным диффузионным насыщением в печи и более низким градиентом концентрации легирующего элемента по поперечному сечению, что уменьшает скалывание диффузионного слоя, а следовательно, уменьшение концентрации легирующего элемента при последующем применении проволоки;
- полученная экономно-легированная проволока можно применять как модификатор серого чугуна. Проведенные исследования подтвердили ее влияние на механические свойства чугуна, в частности значительное снижение твердости чугуна, модифицированного проволокой, подвергнутой диффузионному насыщению алюминием;

- полученное снижение механических свойств, хорошие литейные свойства и низкая склонность к отбелу чугуна может найти применение для ряда отливок: отопительный радиатор, печное литье (дверки, заслонки, колосники).

ЛИТЕРАТУРА

1. Тенденции развития составов модификаторов для чугуна и стали [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ics2.ru/articles>. – Дата доступа: 02.01.2009.
2. Улучшение комплекса мехсвойств серых чугунов модифицированием / В.П. Каргинев [и др.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lityo.com>. – Дата доступа: 02.01.2009.
3. Дынин, А.Я. Модификаторы для производства чугуночного и стального литья / А.Я. Дынин [и др.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lityo.com>. – Дата доступа: 02.01.2009.
4. Шамов, М.Ю. Эффективное модифицирование чугуна в форме / М.Ю. Шамов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lityo.com>. – Дата доступа: 02.01.2009.
5. Техническая информация. Способы модифицирования чугуна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.npp.ru>. – Дата доступа: 14.04.2007.
6. Контейнер для химико-термической обработки проволоки: пат. на полезную модель Респ. Беларусь № 695В 21F 21/00 / В.М. Константинов, А.С. Губанов, Ф.И. Пантелеенко, М.В. Семенченко; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20010301; заявл. 19.12.01; опубл. 30.12.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002.
7. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов / И.Н. Кидин [и др.]. – М.: «Металлургия», 1978. – 320 с.
8. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка металла и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1989. – 255 с.
9. Термоциклическая обработка сталей, сплавов и композиционных материалов / под ред. М.Х. Шорошова. – М.: «Наука», 1984. – 187 с.
10. Способ диффузионного насыщения стальных образцов, преимущественно проволоки: пат. С23С8 00 Респ. Беларусь / В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № а 20080742 от 05.06.2008.
11. Установка для электротермической обработки проволоки: пат. на полезную модель № 696 Респ. Беларусь МПК 7 С21D 1/40 / В.М. Константинов, А.С. Губанов, С.Н. Абраменко, М.В. Семенченко; заявитель Полоц. гос. ун-т. – № u20020065; заявл. 05.03.02.; опубл. 30.12.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002.
12. Константинов, В.М. Электрохимико-термическое насыщение стальной проволоки для защитных покрытий В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич, А.С. Губанов // Материалы междунар. науч.-техн. конф., посв. 75-летию ФТИ. – Минск, 2006. – С. 428 – 434.
13. Семенченко, М.В. Электрохимико-термическая обработка как перспективный способ получения диффузионно-легированной проволоки для защитных покрытий / М.В. Семенченко // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VI междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк: ПГУ, 2007. – Т. 1. – С. 132 – 134.
14. Давыдов, С.В. Влияние титана на структурообразование в сером чугуне / С.В. Давыдов, В.П. Мельников // Литейное производство. – 2006. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.foundrymag.ru>. – Дата доступа: 14.01.2009.

Поступила 06.05.2009